

Identification of adequate Sahel climate prediction models based on CMIP5: Mali case

Indentification des modèles adéquats de prévision du climat sahélien sur la base du CMIP5: Cas du Mali

Hamidou Diawara¹, Vladimir A. Lobanov²

¹Département de Géographie, Faculté d'Histoire et de Géographie, Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako (USSGB), Mali, diawarahamidou@yahoo.fr

² Department of climatology, Russian State Hydrometeorological University (RSHU), Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract— *In this work, a multi-model of evaluation of future normals of temperature and rainfall for Mali was built. For this, the normals of temperature and precipitations of twenty (20) climate models out of the forty-two (42) in the CMIP 5 were compared individually with those of seventeen (17) stations for the temperature and thirty (30) stations for precipitations. The objective function used is the standard deviation, which is even smaller than the model is more efficient. The standard deviation of normals for all models with observations exceeds 10% of the average of precipitations over the territory, however, for the temperature 85.0% of the models (17 out of 20) give standard deviations representing less than 10% of the territorial average of the latter. This which allowed classifying the models, their intrinsic performance for each element of the considered climate. The analysis has shown that most models occupy very different range from one classification to another. Thus, a general classification was made which has shown that the most efficient multi-model for temperature and rainfall are different but the one giving the best approximation for the whole of the two elements (with a minimum of standard deviation) is composed of the models of the Institute Max-Planck of the German meteorology, this is MPI-ESM-LR and MPI-ESM-MR. The performance of this multimodel, compared to that of each of the two models composing it, second rank for temperature and first for precipitations..*

Keywords— *Model; Multimodel; Standard deviation; Scenario; RCP.*

I. INTRODUCTION

Il existe plusieurs méthodes d'estimation du climat futur dont celles basées sur les scénarios d'évolution de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère (SRES) ou sur l'évolution du bilan radiatif de la terre ou "forçage radiatif" (RCP), qui jouent un rôle de premier plan dans les variations du climat global. Pour l'amélioration des modèles du climat et l'identification des modèles les plus efficaces parmi tous les autres, le projet international d'inter-comparaison des modèles AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project) a vu le jour en 1990. C'est dans ce cadre que s'effectue la comparaison des modèles de la circulation globale de l'atmosphère AGGMs (Global Atmospheric General Circulation Models), développés par différents groupes de chercheurs à travers le monde (Gates, 1992), aussi bien entre eux qu'avec les données d'observations (Alves et

al., 2016). Ainsi, en 2005-2006, la troisième phase CMIP3 (Coupled Model Intercomparison Project phase 3) du projet AMIP, sous l'autorité du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), a constitué une archive des résultats de la modélisation du climat passé, présent et futur. Dans cette archive on dénombre quatre (04) familles de scénarios d'évolution du climat (A1, A2, B1 et B2) dans le SRES (Special Report on Emissions Scenarios) et 26 modèles climatiques (Meehl et al., 2007). Ce qui a constitué un bon moyen d'estimation de la dynamique du climat dans le futur dans différentes localités afin d'évaluer les possibles conséquences de ce phénomène et de pouvoir développer des stratégies d'adaptation. Pourtant ces modèles climatiques donnent des estimations, parfois très différentes, des paramètres du climat suivant les zones climatiques connues (suivant les critères choisis, l'ordre

de mérite des modèles diffère. Certains modèles reproduisent bien le climat européen, d'autres sont plus performants pour représenter les systèmes de moussons tropicales¹. Ainsi, la prédétermination des caractéristiques futures fiables du climat dépend de l'efficacité des modèles utilisés. Afin d'aider aux prises de décisions dans la lutte contre les changements climatiques et leurs conséquences à court, moyen et long terme, le choix des modèles pour un milieu concret s'est imposé comme une priorité (Planton, 2003 ; **Foamouhoue et Buscarlet, 2006**). L'évaluation de la performance des modèles du climat consiste à confronter les résultats de leurs simulations aux données d'observations disponibles. Depuis 2012, dans la cinquième phase (CMIP5) du projet AMIP, le nombre et/ou la nature des scénarios et de modèles climatiques a considérablement évolué. Le nombre de scénarios est resté à quatre (RCP2.6, RCP4.5, RCP6 et RCP8.5), mais désormais basés sur l'évolution du bilan radiatif de la terre (Representative Concentration Pathways, ou RCP). Par contre le nombre de modèles a passé à 42 (Taylor et al., 2012), rendant encore plus difficile l'identification du/ou des modèles appropriés pour une région. En plus nous avons assisté à l'apparition de nouveaux modèles dans le CMIP5, souvent au profil de la disparition de certains anciens du CMIP3.

La tâche de la sélection des modèles climatiques performants pour une région donnée est un exercice courant dans les pratiques hydrométéorologiques. Par exemple Perez et al. (2014), dans leur évaluation de la performance des modèles climatiques globaux pour la région nord-est Atlantic, recommandaient, pour des estimations futures du climat régional, les modèles UKMO-HadGEM2, ECHAM5/MPI-OM et MIROC3.2 (hires) pour les scénarios du CMIP3 et ACCESS1.0, ECEARTH, HadGEM2-CC, HadGEM2-ES et CMCC-CM pour ceux du CMIP5. Quant à Jena et al. (2015), ils estimaient que quatre (04) modèles du CMIP5, à savoir CCSM4, CESM1-CAM5, GFDL-CM3 et GFDL-ESM2G, donnaient la meilleure approximation des précipitations de la mousson indienne après comparaison avec les données des observations de 1871 à 2005. Les modèles recommandés dans ces exemples précédents sont tous différents, ce qui montre clairement la complexité spatio-temporelle des conditions climatiques et la nécessité de l'identification des modèles les plus efficaces pour chaque région du monde.

En 2006, la simulation du climat de l'Afrique de l'Ouest tropicale sur la période 1961-1990 a été réalisée par **Foamouhoue et Buscarlet (2006)**. Pour cela, ces

chercheurs ont utilisé le modèle climatique régional HadRM3 développé par le Met Office Hadley Centre. Ils sont arrivés à la conclusion que ce modèle donnait une assez bonne simulation de la température et des précipitations, malgré quelques écarts aux observations mis en évidence, notamment pour les précipitations. Ce modèle, utilisé dans le troisième rapport d'évaluation (Assessment Report 3 – AR3) du GIEC en 2001, a depuis disparu de la liste des modèles climatiques dans suivants rapports.

La plupart des études de comparaison des données, obtenues des modèles climatiques, d'avec les données d'observations se limitent à la comparaison individuelle des modèles. Or il s'avère que généralement l'utilisation d'un multimodèle (ensemble de modèles) apporte moins d'erreurs, comparativement à l'utilisation d'un seul modèle (Malenfant, 2016). Cela est dû au fait que les biais s'annulent dans le multimodèle, permettant d'obtenir des erreurs absolues plus petites que pour les modèles individuels.

L'approche multimodèle est couramment utilisée en modélisations hydrologiques et météorologiques depuis le début des années 1980. Pratiquement tous les auteurs (Shamseldin et al., 1997 ; Fritsch et al., 2000) qui s'y sont essayés sont arrivés à la même conclusion, qui est la plus grande précision du multimodèle comparé aux modèles individuels.

Mais la performance d'un multimodèle n'est pas forcément proportionnelle au nombre de modèles individuels qui le composent (Ajami et al., 2006). Un multimodèle composé d'un nombre restreint de modèles peut être beaucoup plus performant qu'un multimodèle plus complexe.

Ainsi, l'objectif principal de cette étude est l'identification des modèles climatiques efficaces, issus du CMIP5, pour la construction d'un multimodèle performant d'évaluation des conditions climatiques futures de la température et des précipitations au Mali.

Les objectifs spécifiques qui en découlent sont :

- Evaluation de la performance intrinsèque de chaque modèle climatique utilisé en comparaison des données d'observations de la température et des précipitations.
- Classification des modèles selon leurs performances individuelles et le choix des meilleurs pour la construction du multimodèle de la température et des précipitations au Mali.
- Comparaison de la performance du multimodèle avec celle de chacun des modèles individuels le composant.

¹ Climat. Modéliser pour comprendre et anticiper : http://www.insu.cnrs.fr/files/plaquette_missterre.pdf

II. CADRE GEOGRAPHIQUE DE L'ETUDE

L'étude a été réalisée sur l'ensemble du territoire du Mali (Figure1). Le pays, situé au cœur de l'Afrique de l'Ouest, est caractérisé par un climat chaud avec l'alternance d'une saison sèche et d'une saison des pluies. La durée de ces deux saisons varie inversement du sud au nord. La première est courte au sud et longue au nord. Le cumul pluviométrique annuel sur le territoire varie de moins de 200 mm à plus de 1000 mm. Selon la quantité de pluie reçue par an et la durée de la saison des pluies, le territoire du Mali est habituellement divisé en quatre zones agroclimatiques (DNM, 2007); il s'agit, du sud au nord, de:

- la zone Soudano-guinéenne (ou pré-guinéenne) avec une saison des pluies qui dure plus de 6 mois et une pluviométrie annuelle dépassant 1000 mm;
- la zone Soudanienne dont la saison des pluies dure environ 5 mois et le cumul annuel des pluies se situe entre 600 mm et 1000 mm;
- la zone Sahélienne avec une pluviométrie de 200 mm à 600 mm en 3-4 mois;
- la zone Saharienne dont la pluviométrie annuelle est inférieure à 200 mm et la saison des pluies ne dure que 2 mois.

III. MATERIELS ET METHODES

3.1 Matériels

Dans cette étude nous avons utilisé les températures moyennes annuelles et les précipitations annuelles, sur trente ans (1951-1980), de dix-sept (17) stations pour la température et de trente (30) stations pour les précipitations, réparties sur tout le territoire du Mali. Nous nous sommes limités aux données d'observations de la période climatique de 1951 à 1980 pour deux raisons fondamentales: 1. la faible qualité des données observées des années plus récentes; 2. cette période est considérée comme la dernière de la stabilité du climat. Pour ces stations et sur la même période, une base de données de types identiques a été constituée pour vingt (20) modèles climatiques retenus. Les détails sur ces derniers sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau 1: Informations générales sur les modèles climatiques retenus

Nº	Modèle	Institution	Pays
1	CSIRO-Mk3.6.0	CSIRO-QCCCE	Australia
2	CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	Canada
3	BCC-CSM1.1	Beijing Climate Center	China
4	BNU-ESM	College of Global Change and Earth System Science	China

Nº	Modèle	Institution	Pays
5	CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques	France
6	IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace	France
7	MPI-ESM-LR	Max-Planck-Institut für Meteorologie	Germany
8	MPI-ESM-MR	Max-Planck-Institut für Meteorologie	Germany
9	CMCC-CM	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	Italy
10	MIROC5	MIROC	Japan
11	MIROC-ESM	MIROC	Japan
12	NorESM1-M	Norwegian Climate Centre	Norway
13	INMCM4.0	Institute for Numerical Mathematics	Russia
14	HadGEM2-AO	Met Office Hadley Centre	UK
15	HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre	UK
16	HadCM3	Met Office Hadley Centre	UK
17	GISS-E2-R	NASA Goddard Institute for Space Studies	USA
18	CCSM4 (Journal)	National Center for Atmospheric Research	USA
19	GFDL-CM3	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	USA
20	EC-EARTH	EC-EARTH consortium	Various

Les données d'observations ont été fournies par le service météorologique du Mali. Quant aux données des modèles, elles ont été recueillies de la plateforme canadienne « Données maillées du CMIP5 »², sous forme de maillage et en format « NetCDF ». Elles ont subi de multiples prétraitements tels que leur extraction en format « xlsx » et la constitution des séries pour chaque station par interpolation linéaire double ou bilinéaire (Thierry, 1986).

3.2 Méthodes

Pour l'atteinte des objectifs de l'étude, nous avons eu recours à différentes procédures d'analyse des données, chaque objectif étant spécifique. Les données de la température de l'air et des précipitations sont analysées séparément.

3.2.1 Evaluation de la performance intrinsèque de chaque modèle climatique

La performance d'un modèle climatique est évaluée en fonction de la comparaison des données dont il génère avec les données réelles mesurées sur le terrain. Pour ce travail, dans un premier temps, les normales de la température et des précipitations de 1951 à 1980 ont été calculées pour chacune des stations météorologiques,

² Données maillées du CMIP5, <http://scenarios-climatiques.canada.ca/?page=gridded-data>

avec les données d'observations historiques et les données de chaque modèle climatique. Ensuite ces normales climatiques, d'observations et de chaque modèle, sont comparées. Le critère (la fonction-objectif) choisi pour l'évaluation de la qualité d'approximation des observations par le modèle est l'écart-type:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs.} - X_{mod.})^2}{n}} \quad (1)$$

où $X_{obs.}$ est la normale des observations ; $X_{mod.}$ est la normale du modèle et n est le nombre de stations (ici n égal à pour 17 la température et 30 pour les précipitations).

L'interprétation de cette fonction-objectif est: « le modèle est d'autant plus performant que l'écart-type est petit ».

3.2.2 Classification des modèles selon leurs performances individuelles et la construction du multimodèle

La performance du modèle est inversement proportionnelle à l'écart-type obtenu de sa comparaison avec les observations. Pour chaque élément du climat de l'étude (température et précipitations), les modèles ont été rangés par ordre décroissant de la performance, du plus performant (ayant le plus petit écart-type) au moins performant (ayant le plus grand écart-type).

Pour la définition du multimodèle pour chaque élément du climat, à partir du modèle de rang 1 (le plus performant) les moyennes pour les stations ont été calculées, en intégrant progressivement les modèles de rangs suivants, et comparées aux observations selon la fonction-objectif précédemment définie jusqu'à l'obtention du maximum de vraisemblance. Mais le multimodèle définitif pour l'ensemble de la température et des précipitations doit comporter les modèles classés parmi les meilleurs pour chacun d'eux.

3.2.3 Comparaison du multimodèle avec chacun des modèles le composant

L'étape précédente permet de déterminer la composition du multimodèle pour la prédétermination des conditions climatiques futures sur la base des scénarios climatiques. Afin de vérifier l'hypothèse qui stipule la performance du multimodèle par rapport à chacun des modèles qui le composent, une classification de cet ensemble est réalisée dont le multimodèle fait partie.

IV. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats obtenus des différents traitements statistiques auxquels ont été soumises les données d'observations et des modèles climatiques sont présentés dans l'ordre des objectifs spécifiques que s'était fixée cette étude.

4.1.1 Evaluation de la performance intrinsèque de chaque modèle climatique

Les premiers résultats de l'étude portent sur l'évaluation de la performance de chacun des modèles utilisés, sur la base des écart-types calculés. La distribution des écart-types selon le modèle pour la température et les précipitations est présentée sur la Figure 2. Pour faciliter la représentation graphique avec ceux de la température, les écart-types pour les précipitations (qui sont d'ordre très élevé) ont été divisés par cent (100). Et pour faciliter l'analyse de la figure, des limites de 10% de la moyenne sur le territoire des normales de la température et des précipitations ont été matérialisées sur cette dernière par deux traits verticaux.

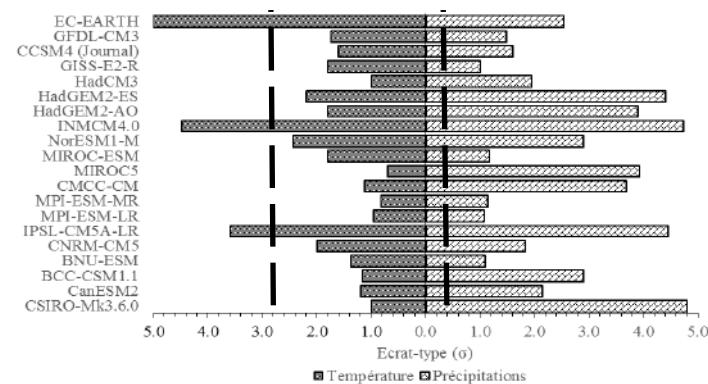


Fig.2 : Distribution des écart-types selon le modèle pour la température et les précipitations.

N.B.: Les traits hachurés verticaux représentent 10% de la moyenne des normales de l'ensemble des stations.

L'analyse de la figure montre une différente remarquable entre les performances de la plupart des modèles pour la température et les précipitations. On remarque que l'écart-type de tous les modèles dépasse 10% de la moyenne des précipitations sur le territoire. Il y a cinq (05) modèles (GISS-E2-R, MPI-ESM-LR, BNU-ESM, MPI-ESM-MR et MIROC-ESM) sur les vingt (20) qui donnent des écart-types entre 10% et 20%.

Pour la température, les modèles donnant moins de 10% de la moyenne sont beaucoup plus nombreux, ils représentent 85,0% (soit 17 modèles sur 20 que compte l'ensemble). Cela montre que les modèles donnent une meilleure approximation de la température que des précipitations, ce qu'avec pu remarquer **Foamouhoue et Buscarlet (2006)**. Parmi ces modèles, les cinq (05) premiers par ordre décroissant sont : MIROC5, MPI-ESM-MR, MPI-ESM-LR, CSIRO-Mk3.6.0 et HadCM3. Aucun des modèles classés ici parmi les meilleurs n'a été retenu par **Perez et al. (2014)**, dans leur évaluation de la performance des modèles climatiques globaux pour la

région nord-est Atlantic. Le même constat est valable par rapport aux conclusions de l'étude menée par [Jena et al. \(2015\)](#) sur la qualité des modèles dans l'approximation des précipitations de la mousson indienne. Parmi les modèles recommandés par ces auteurs, il y'en a cinq (05), soit CMCC-CM, HadGEM2-ES, EC-EARTH (pour [Perez et al., 2014](#)) et CCSM4 (Journal), GFDL-CM3 (pour [Jena et al., 2015](#)) qui ont été analysés dans cette étude et qui se sont avérés beaucoup moins performants pour les conditions climatiques du Mali. Cette analyse nous permet de comprendre que la performance des modèles climatiques est très variables dans l'espace d'où la nécessité de leur vérification et validation avant toute application de ceux-ci pour une zone climatique donnée.

4.1.2 Classification des modèles selon leurs performances individuelles et la construction du multimodèle

Les modèles sont rangés selon leurs performances, celui de rang 1 étant le plus performant de tous. La classification des modèles est effectuée aussi bien pour chaque élément du climat utilisé dans l'étude (température et précipitations) que pour les deux. Cette dernières s'est basée sur la moyenne des rangs des modèles pour les deux éléments. Ces classifications, en fonction des écarts-types des approximations des observations par des modèles, est donnée le tableau suivant :

Tableau 2 : Classification des modèles climatiques selon leurs performances

Modèle	Ecart-type (σ) [Rang]		Rang général
	Température, °C	Précipitations, mm	
MPI-ESM-LR	0.95 [3*]	106.84 [2**]	1
MPI-ESM-MR	0.82 [2*]	114.00 [4**]	2
BNU-ESM	1.37 [9]	108.44 [3**]	3
HadCM3	0.99 [4*]	194.26 [9]	4
GISS-E2-R	1.79 [14]	99.15 [1**]	5
MIROC5	0.69 [1*]	392.46 [16]	6
CCSM4 (Journal)	1.59 [10]	159.95 [7]	7
GFDL-CM3	1.74 [11]	147.28 [6]	8
CanESM2	1.20 [8]	214.19 [10]	9
MIROC-ESM	1.79 [13]	116.20 [5**]	10
BCC-CSM1.1	1.16 [7]	290.30 [13]	11
CMCC-CM	1.12 [6]	367.41 [14]	12
CNRM-CM5	1.99 [15]	182.99 [8]	13
CSIRO-Mk3.6.0	0.99 [5*]	479.86 [20]	14
HadGEM2-AO	1.79 [12]	389.05 [15]	15
NorESM1-M	2.42 [17]	290.24 [12]	16

Modèle	Ecart-type (σ) [Rang]		Rang général
	Température, °C	Précipitations, mm	
EC-EARTH	5.00 [20]	252.86 [11]	17
HadGEM2-ES	2.18 [16]	440.61 [17]	18
IPSL-CM5A-LR	3.59 [18]	444.26 [18]	19
INMCM4.0	4.47 [19]	472.94 [19]	20

N.B.: * indique les 5 meilleurs modèles pour la température et ** indique meilleurs modèles pour les précipitations.

Ce tableau nous permet de constater que les rangs, dans la hiérarchie des modèles, sont très différents pour la plupart des modèles en fonction de l'élément climatique (température ou précipitations). Par exemple les modèles GISS-E2-R et MIROC5 occupent respectivement les rangs 14 et 1 pour la température et les rangs 16 et 1 pour les précipitations. Seuls deux (02) modèles occupent le même rang dans les deux classifications. Ces modèles sont IPSL-CM5A-LR (rang 18) et INMCM4.0 (rang 19). Il est aussi à noter que seuls deux (02) modèles (les modèles MPI-ESM-LR et MPI-ESM-MR de Max-Planck-Institut für Meteorologie d'Allemagne) sont présents dans le groupe des cinq (05) plus performants modèles à la fois de la température et des précipitations. Les trois autres modèles du groupe des cinq (05) meilleurs selon le classement général sont BNU-ESM (College of Global Change and Earth System Science, China), HadCM3 (Met Office Hadley Centre, UK) et GISS-E2-R (NASA Goddard Institute for Space Studies, USA).

La comparaison des performances des multimodèles formés pour la température est illustrée sur la Figure 3. Sur cette figure la fourchette de rangs indiquée signifie la composition du multimodèle. Par exemple le Multimodèle de rang 1 à 2 est composé des deux (02) premiers modèles selon leur classification dans le tableau 2 et le Multimodèle de rang 1 à 10 est composé des dix (10) premiers et ainsi de suite.

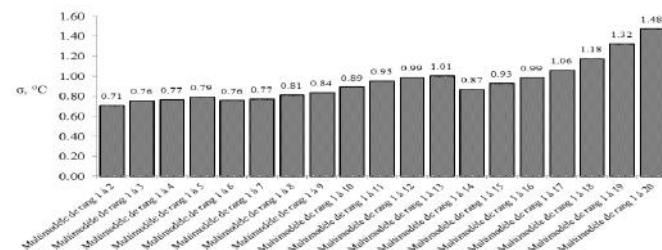


Fig. 3 : Illustration de la comparaison des performances des multimodèles pour la température, composés de 2 jusqu'à 20 modèles climatiques.

La figure montre que le multimodèle le plus performant pour la température est celui formé des deux (02) premiers modèles uniquement (MIROC5 et MPI-ESM-

MR). Après on constate que, globalement, la performance du multimodèle est plus faible d'autant plus que le nombre de modèles est élevé. Ce qui conforte la thèse de Ajami et al. (2006)³.

Quant aux multimodèles pour les précipitations, ils sont présentés sur la figure suivante :

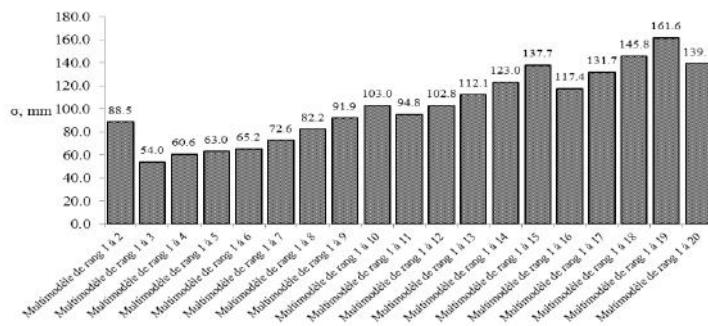


Fig.4 : Illustration de la comparaison des performances des multimodèles pour les précipitations, composés de 2 jusqu'à 20 modèles climatiques.

Ici, le multimodèle le plus performant est celui composé des trois (03) premiers modèles, à savoir GISS-E2-R, MPI-ESM-LR et BNU-ESM. Le même constat que pour la Figure 3, par rapport à la diminution de la performance du multimodèle avec l'augmentation du nombre de modèles le composant, est aussi valable ici.

Ainsi, compte tenu du fait susmentionné que les modèles MPI-ESM-LR et MPI-ESM-MR sont les seuls ayant un rang confortable (parmi les 5 premiers) dans la classification de ceux-ci aussi bien pour la température que pour les précipitations (voir tableau 2), ils sont recommandés pour la composition du multimodèle unique d'évaluation des normales de la température et des précipitations au Mali.

4.1.3 Comparaison du multimodèle avec chacun des modèles le composant

Enfin cette dernière tâche a été réalisée suite à la comparaison de la performance du multimodèle MPI-ESM-LR/MPI-ESM-MR avec celle de chacun des deux (02) modèles le composant. Ces comparaisons sont présentées sur la Figure 5 (pour la température) et la Figure 6 (pour les précipitations).

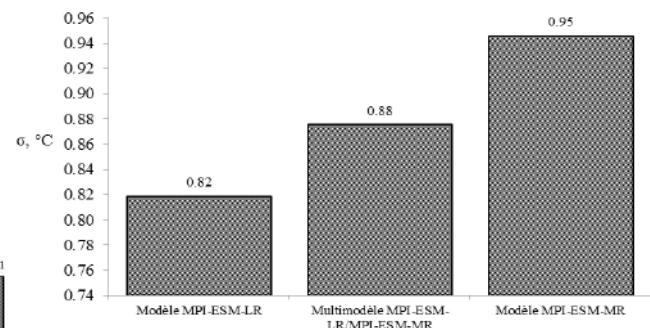


Fig.5 : Comparaison de la performance du multimodèle avec celle de chacun des modèles le composant, cas de la température.

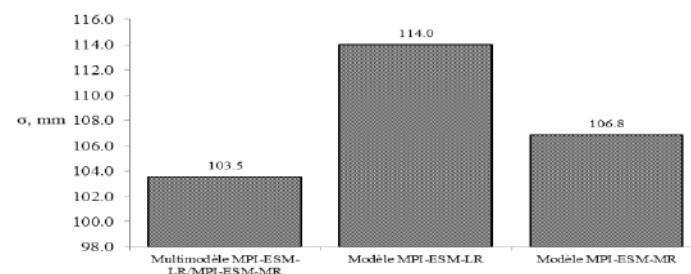


Fig.6 : Comparaison de la performance du multimodèle avec celle de chacun des modèles le composant, cas des précipitations.

L'analyse comparative des deux (02) figures permet d'affirmer que le multimodèle MPI-ESM-LR/MPI-ESM-MR, pour la température, donne un meilleur résultat que le modèle MPI-ESM-MR, mais de moins bon que le modèle MPI-ESM-LR. Au même moment, le multimodèle s'est avéré plus efficace que chacun des modèles le composant pour les précipitations.

Ainsi, pour l'évaluation des normales de la température et des précipitations au Mali, sur la base des vingt (20) modèles climatiques utilisés dans cette étude, l'hypothèse de la meilleur performance du multimodèle par rapport à celle des modèles individuels qui le composent (Shamseldin et al., 1997 ; Fritsch et al., 2000) est vérifiée pour le cas de la température mais ne l'est pas pour le cas des précipitations.

V. CONCLUSION

Cette étude nous a permis de construire un multimodèle d'estimation des normales de la température et des précipitations au Mali. Nous avons constaté que la performance de la plupart des modèles pour la température et les précipitations, en comparaison avec les observations, est très faible. L'écart-type des normales pour tous les modèles avec les observations dépasse 10% de la moyenne des précipitations sur le territoire. Les

³ La performance d'un multimodèle n'est pas forcément proportionnelle au nombre de modèles individuels le composant.

meilleurs modèles, avec un écart-type variant entre 10% et 20% de la moyenne, pour l'approximation des précipitations, sont GISS-E2-R, MPI-ESM-LR, BNU-ESM, MPI-ESM-MR et MIROC-ESM. Par contre pour la température 85,0% des modèles (17 sur 20) donnent des écart-types représentant moins de 10% de la moyenne territoriale de celle-ci. Ici les modèles MIROC5, MPI-ESM-MR, MPI-ESM-LR, CSIRO-Mk3.6.0 et HadCM3 se sont révélés meilleurs aux autres.

La classification des modèles selon leurs performances intrinsèques pour la température et les précipitations a montré une différence notable de rangs de certains modèles en fonction de l'élément climatique approché. Par exemple les modèles GISS-E2-R et MIROC5 occupent respectivement les rangs 14 et 1 pour la température et les rangs 16 et 1 pour les précipitations. Seuls deux (02) modèles sont présents à la fois dans le groupe des cinq (05) plus performants modèles de la température et des précipitations, ce sont les modèles MPI-ESM-LR et MPI-ESM-MR de Max-Planck-Institut für Meteorologie d'Allemagne. C'est pourquoi l'étude recommande ces modèles pour la composition du multimodèle unique d'évaluation des normales de la température et des précipitations au Mali.

Ce multimodèle, comparé à chacun des modèles le composant, s'est avéré plus efficace que chacun de ces composants pour les précipitations alors qu'il est moins efficace que le modèle MPI-ESM-LR pour la température.

On peut donc recommander le modèle MPI-ESM-LR l'estimation séparée de la normale de la température dans les scénarios climatiques. Mais pour les études faisant intervenir à la fois la température et les précipitations, le multimodèle MPI-ESM-LR/MPI-ESM-MR de Max-Planck-Institut für Meteorologie d'Allemagne plus efficace.

REFERENCES

- [1] Ajami, N. K., Duan, Q., Gao, X., et Sorooshian, S. (2006). Multimodel combination techniques for analysis of hydrological simulations: Application to distributed model intercomparison project results. *Journal of Hydrometeorology*, 7(4), 755-768.
- [2] Alves, J.M.B., Vasconcelos Junior, F.C., Chaves, R.R., Silva, E.M., Servain, J., Costa, A.A., Sombra, S.S., Barbosa, A.C.B., Dos Santos, A.C.S. (2016). Evaluation of the AR4 CMIP3 and the AR5 CMIP5 Model and Projections for Precipitation in Northeast Brazil. *Front. EarthSci.* 4:44. DOI : 10.3389/feart.2016.00044.
- [3] Direction Nationale de la Météorologie (2007). Programme d'Action National d'Adaptation aux Changements Climatiques : 100 p.
- [4] Foamouhoue, A.K., Buscarlet, E. (2006). Simulation du climat de l'Afrique de l'Ouest à l'aide d'un modèle climatique régional Validation sur la période 1961-1990. *La Météorologie* - n° 52, 28-37.
- [5] Fritsch, J., Hilliker, J., Ross, J., Vislocky, R. (2000). Model consensus. *Weather and forecasting*, 15(5), 571-582.
- [6] Gates, W.L. (1992). The Atmospheric Model Intercomparison Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 73, pp. 1962-1970.
- [7] Jena, P., Azad, S., Rajeevan, M.N. (2015). Statistical Selection of the Optimum Models in the CMIP5 Dataset for Climate Change Projections of Indian Monsoon Rainfall. *J. Climate* 2015, 3, 858-875.
- [8] Malenfant, C. (2016). Analyse de sensibilité d'un multimodèle hydrologique. (Maîtrise en génie des eaux). Université Laval. Québec.
- [9] Meehl, G.A., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B., Mitchell, J.F.B., Stouffer, R.J., Taylor, K.E. (2007). The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research. *Bulletin of the American Meteorological Society* 88: 1383-1394.
- [10] Perez, J., Menendez, M., Mendez, F.J., Losada, I.J. (2014). Evaluating the performance of CMIP3 and CMIP5 global climate models over the north-east Atlantic region. *Clim Dyn.* DOI: 10.1007/s00382-014-2078-8.
- [11] Planton, S. (2003). A l'échelle des continents : le regard des modèles. *Comptes Rendus Geoscience*. Vol. 335, n° 6-7, 535-543.
- [12] Shamseldin, A.Y., O'Connor, K.M., Liang, G.C. (1997). Methods for combining the outputs of different rainfall-runoff models. *Journal of Hydrology*, 197(1), 203-229.
- [13] Taylor, K.E., Stouffer, R.J., Meehl, G.A. (2012). An overview of CMIP5 and experiment design. *Bull. American Meteorological Society*, pp. 485-498.
- [14] Thiery, D. (1986). Interpolation dans un maillage et visualisation par isovaleurs. Mode d'emploi du logiciel INGRID. BRGM, 40 p.